



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Vuolukivien mineralogia ja hyödyntäminen

Ilmari Aulio

GEOTIETEIDEN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Vuolukivien mineralogia ja hyödyntäminen

Ilmari Aulio

Oulun yliopisto, geotieteiden tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö, 2021

Työn ohjaajat: Jukka-Pekka Ranta, Anne Huhta

Vuolukiviä hyödynnetään yhteiskunnassa monenlaisiin käyttötarkoituksiin, kuten esimerkiksi vuolukiviuunien valmistamiseen ja rakennusten seinien verhousten tekemiseen. Jotta osataan valita oikeanlaista vuolukiveä uunien sekä muiden asioiden ja esineiden valmistamiseen, on oleellista tietää vuolukivien luokitteluperiaatteet sekä niiden ominaisuudet. Etenkin erilaisten vuolukivilajien tunnistaminen eroavaisuuksineen on tärkeää, sillä niiden ominaisuudet erilaisissa olosuhteissa vaihtelevat suuresti.

Vuolukivien ominaisuuksien ja käyttökohteiden vuoksi on tärkeää ymmärtää niiden syntytavat ja syntymisympäristöt sekä nykyiset esiintymisalueet. Tämän lisäksi vuolukivien luokittelu ja oikeanlainen nimeäminen sekä fysikaalisten ominaisuuksien tutkiminen ja ymmärtäminen on tärkeää, koska teollisuudessa vuolukiven käyttö painottuu nimenomaan niiden pehmeeyteen, lämmönkestävyyteen ja tiheyteen. Tästä syystä vuolukivi on erinomainen luonnonkivi moniin eri tarkoituksiin.

Työssä käsitellään esimerkiksi vuolukivien fysikaalisia ominaisuuksia, kuten tiheyttä sekä rakenteellisia ominaisuuksia. Tämän lisäksi tarkastellaan erilaisten vuolukivilajien eroavaisuuksia, niiden erinomaisia lämpöominaisuuksia ja niiden käytettävyyttä tulisijojen rakennusmateriaalina. Tärkeitä huomioita työssä ovat muun muassa korkean kuumuuden ja lämpötilojen nopeiden vaihteluiden aiheuttaman rasituksen vaikutus kiviin sekä se, kuinka hyvin erilaiset vuolukivilajit pystyvät kestäämään sitä. Lisäksi tietyissä lämpötiloissa tapahtuvat mineralogiset muutokset ja niiden vaikutus kiven kestäväyyteen ovat tärkeitä huomioitavia seikkoja. Kestäväyyteen liittyen myös vuolukivien mikrorakenteilla ja suuntautumilla on merkitystä, koska kivien kestävyysominaisuudet vaihtelevat eri suunnissa.

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	3
2. Vuolukivien hyödyntäminen	4
2.1 Uunit ja takat	4
2.2 Muut käyttötavat	5
3. Vuolukivet	5
3.1 Syntyperä	6
3.2 Esiintyminen	7
3.3 Luokittelu	8
3.4 Mikrorakenteet	10
3.5 Tiheys	12
4. Vuolukivien lämpöominaisuudet	13
4.1 Lämmönjohtavuus	14
4.2 Ominaislämpö	15
4.3 Lämpölaajeneminen	16
4.4 Lämpöhajoaminen	17
4.5 Termisen sokin kestävyys	18
4.6 Lämmön aiheuttamat mineralogiset muutokset	19
5. Yhteenveto	20

LÄHDELUETTELO

1. JOHDANTO

Ihmiset ovat jo tuhansia vuosia hyödyntäneet vuolukiviä eri käyttötarkoituksiin sen helpon louhittavuuden ja työstettävyyden vuoksi (Storemyr, 2004; Hansen & Storemyr, 2017). Vuolukivi on pinnasta saippuamaisen tuntuinen kivilaji, jonka vuoksi se on saanut myös englanninkielisen nimensä ”soapstone” eli saippuakivi. Suomenkielisen nimen kivi on saanut siitä, että se on erittäin helposti työstettävissä pehmeytensä vuoksi. Näiden ominaisuuksiensa lisäksi vuolukivet kestävät yleisesti hyvin kuumuutta, ja niillä on muun muassa korkea tiheys, lämmön varastointikapasiteetti ja ominaislämpökapasiteetti (Kärki ym., 2013). Selkosen ym. (2018) mukaan osa vuolukivilajeista kestävät kuumuutta jopa hormitiiliä paremmin. Nykypäivänä vuolukiviteollisuus käyttää kiveä pääasiassa takkojen ja uunien valmistamiseen.

Vuolukivet ovat talkkia sisältäviä kiviä, joiden talkkipitoisuus on aina alle 75%, mutta yli 35% (Huhta & Kärki, 2018). Mitä alhaisempi talkkipitoisuus, sitä vaikeammin työstettävissä kivi on (Huhta & Kärki, 2018). Vuolukivien mineraalikoostumus on vaihteleva. Tärkeimpinä mineraaleina talkin lisäksi ovat karbonaatit, serpentiini, kloriitti ja amfibolit (Huhta, 2019). Mineralogian vuoksi vuolukivien fysikaalisissa ja kemiallisissa ominaisuuksissa sekä rakenteissa nähdään paljon vaihtelua, ja päämineraalikoostumusten mukaan vuolukivet voidaan jaotella erilaisiin vuolukivilajeihin (Huhta, 2019). Mineraalikoostumus vaikuttaa siis oleellisesti eri vuolukivilajien ominaisuuksiin, kuten lämmönkestävyyteen. Tämän lisäksi myös kuumuudelle altistumisen seurauksena tapahtuvat reaktiot vuolukivissä vaikuttavat siihen, miten vuolukivi kestää korkeita lämpötiloja (Huhta ym., 2019).

Tässä työssä tarkastellaan yleisesti vuolukivien perusominaisuuksia, käyttötapoja, luokittelua sekä lyhyesti niiden syntytapoja ja esiintymisalueita. Vuolukivien lämpöominaisuudet ja niiden merkitys hyödyntämisen kannalta, etenkin tulisijojen materiaalina ovat myös tärkeässä osassa. Lisäksi työssä pyritään vastaamaan kysymyksiin, kuten minkälaista kiveä voidaan kutsua vuolukiveksi ja minkä tyyppisiä vuolukivilajeja on olemassa.

2. VUOLUKIVIEN HYÖDYNTÄMINEN

1800-luvun alussa vuolukiveä sekä talkkia alettiin hyödyntämään runsaasti, kun nopeasti tapahtunut ja etenevä teollistuminen kasvatti talkin tarvetta koneistojen voitelua varten (Huhta & Kärki, 2018). Samalla vuolukivien käyttö rakennuskivenä ja materiaalina uunien valmistamisessa, sekä talkin käyttö teollisuusmineraalina nostatti vuolukiviesiintymien taloudellista merkittävyyttä tuntuvasti (Huhta & Kärki, 2018). Vuolukiven suosio johti 1900-luvun alussa myös lukuisiin tieteellisiin tutkimuksiin ja samalla useita vuolukivilouhoksia avattiin ympäri maailmaa (Huhta & Kärki, 2018).

Vuolukivien hyödyntäminen on muuttunut aikojen saatossa, ja nykyään käyttö arkipäiväisissä tarve-esineissä ja työvälineissä on vähäistä, parempien materiaalien löytämisen johdosta (King, 2016; Hansen & Storemyr, 2017). Hyvin monet vuolukiven hyödyntämistavat ovatkin siis historiallisia, satojen ja jopa tuhansien vuosien takaisia (Hansen & Storemyr, 2017).

2.1 Uunit ja takat

Etenkin magnesiittivuolukiveä hyödynnetään nykypäivänä laajalti uunien ja takkojen valmistamiseen (Huhta ym., 2019). Useat suomalaiset yhtiöt ovat toimineet alalla useita vuosia, louhien vuolukiveä pääasiassa Itä-Suomesta ja valmistaen tulisijoja kotitalouksille (Kärki ym., 2013). Jo 1800-luvun loppupuolelta saakka Suomessa on valmistettu vuolukiviuuneja (NunnaUuni Oy; Pekkarinen ym., 2006).

Vuolukivien monipuolisuus antaa mahdollisuudet tuottaa monenlaisia, erilaisiin käyttötarkoituksiin suunniteltuja uuneja ja takkoja. Vuolukiviuunien viehätys kumpuaa siitä, että ne ovat ympäristöystävällisiä, luonnonmateriaalista valmistettuja, ja niiden pinnan kuviointi sekä väri vaihtelevat, riippuen minkälaisesta vuolukivestä uuni on valmistettu. Kuitenkin väritys vuolukivissä useimmiten pysyy harmaan sävyissä saattaen sisältää myös hieman vihreää tai sinistä, ja ajan kuluessa vuolukiven pinta tummenee (Kärki ym., 2013). Hienon ulkonäön lisäksi se, että lämmittäessä vuolukiviuuni kerää hyvin lämpöä itseensä ja ikään kuin hohkaa sitä hyvin pitkään, on haluttu ominaisuus omakotitalojen lämmittämisen ja mukavuuden kannalta.

2.2 Muut käyttötavat

Uunien lisäksi vuolukiveä on käytetty ja käytetään erilaisiin käyttötarkoituksiin, jotka usein painottuvat vuolukivien pehmeystä juontuvaan vuoltavuuteen, mutta myös sen korkeasta tiheydestä johtuvaan läpäisemättömyyteen (Storemyr & Heldal, 2002; King, 2016; Pirinen ym., 2018). Vuolukivien käyttöä materiaalina hyödynnetään esimerkiksi erilaisten veistosten ja patsaiden tekemiseen sekä ranne- ja kaulakorujen valmistamiseen (King, 2016). Vuolukiveä voidaan käyttää myös rakennuskivinä, laatoituksissa, seinien verhouksissa sekä pesualtaiden, keittiötasojen, savupiippujen ja hautakivien valmistamisessa (King, 2016; Hansen & Storemyr, 2017). Historiallisesti vuolukiviä on käytetty jo ihmisten aikaisimmissa yhteiskunnissa, muun muassa moniin yleishyödyllisiin käyttötarkoituksiin, kuten astioiden ja työvälineiden valmistamiseen (Storemyr & Heldal, 2002).

3. VUOLUKIVET

Vuolukiviksi on kutsuttu yleisesti kiviä, jotka sisältävät suurimmaksi osaksi talkkia tai talkin kaltaisia mineraaleja (Wiik, 1953). Lisäksi termiä ”vuolukivi” on käytetty talkkia sisältävistä, alhaisen- ja keskiasteen metamorfisista kivistä, jotka ovat syntyneet ultramafisten magmakivien muutoksen seurauksena (Vesasalo, 1965). Vuolukiviksi on yleisesti kutsuttu kiviä, jotka ovat riittävän pehmeitä vuolemiseen, kestävät hyvin lämpörasitusta sekä sisältävät suurimmaksi osaksi talkkia (Huhta, 2019).

Vuolukiville sekä muille alhaisen ja keskiasteen metamorfisille, ultramafisille kiville ominaisia mineraaleja ovat talkin lisäksi muun muassa serpentiini, kloriitti, Mg-rikkaat silikaatit ja useat Mg-, Fe-, ja Ca-pitoiset karbonaatit (Huhta & Kärki, 2018). Näiden jo mainittujen mineraalien lisäksi vuolukivet voivat sisältää kiilteitä sekä magmaattisten ja metamorfisten prosessien synnyttämiä mafisten mineraalien jäänteitä, kuten pyrokseenia ja oliviinia (Huhta & Kärki, 2018). Vuolukivissä esiintyy myös oksideja ja sulfideja, joista yleisimpiä ovat magnetiitti, kromiitti, rikkikiisu, kuparikiisu ja magneetikiisu (Kärki ym., 2013). Riippuen protoliitin mineraalikoostumuksesta, näiden mineraalien osuus voi vuolukivissä vaihdella lähes rajattomasti (Huhta & Kärki, 2018).

Vuolukivien mineraloginen koostumus vaihtelee runsaasti vaikuttaen niiden käyttötarkoitukseen (Huhta, 2019). Jopa samasta vuolukiviesiintymästä voi löytyä laaja valikoima erilaisen kemiallisen koostumuksen sekä rakenteen omaavaa vuolukiveä (Huhta, 2019). Nämä eroavaisuudet rakenteessa, kemiallisessa koostumuksessa, mineraalikoostumuksessa, raekoossa, huokoisuudessa ja mikrorakenteissa vaikuttavat kiven kestävyYTEEN ja käytettävyyTEEN.

3.1 Syntyperä

Vuolukivet ovat metamorfisia kivilajeja ja niiden lähtömateriaali on peräisin maan vaipasta (Kärki & Gehör, 2005). Vaipan materiaali on kemialliselta koostumukseltaan ultraemäksistä, eli se sisältää piitä huomattavasti vähemmän kuin maankuoren kiviaines (Wyllie, 1967). Näissä vaipan ultraemäksisissä kivissä on piin sijaan rautaa ja magnesiumia, minkä takia niiden ominaispainot sekä tiheys ovat selvästi tyypillisiä maankuoren kivilajeja suurempia (Wyllie, 1967; Kärki & Gehör, 2005). Kaikkien vuolukivien katsotaan saaneen lähtömateriaalinsa magmasyntysisistä kivilajeista, kuten ultraemäksisistä syväkivistä tai pintakivistä (Kärki ym., 2013).

Tyypillisin prosessi, missä prekambrisia ja nuorempia vuolukiviä voi syntyä, on plutonis- ja ekstrusiiviperäisten ultramafisten kivien metamorfinen ja metasomaattinen muuntuminen (Zhang ym., 1995; Marques ym., 2017). Yleisimpiä vuolukivien protoliitteja ovat muun muassa ultramafiset, ofioliittiset, vaippaperäiset magmakivet, mutta myös komatiittiset oliviinirikkaat kumulaatit (Eckstrand, 1975; Lindahl & Nilsson, 2008; Huhta ym., 2016). Näiden lisäksi myös magnesiumrikkaiden karbonaattisedimenttikivien on esitetty olevan mahdollinen protoliitti osalle vuolukivilajeista (Huhta ym., 2016). Esimerkkinä Itä-Suomen arkeeisella vihreäkivivyöhykkeellä sijaitsevat alueet, missä Luukkonen & Sorjonen-Ward (1998) mukaan vuolukivet ovat komatiittisista oliviinikumulaateista muuttumalla syntyneet.

Suomalaiset, pääosin Itä-Suomessa sijaitsevat vuolukiviesiintymät ovat syntyneet, kun alkuperäinen vaipan materiaali on muodostunut osaksi merellistä kuorta arkeeisena ajanjaksona (Luukkonen & Sorjonen-Ward, 1998; Kärki & Gehör, 2005). Näiden vuolukivien protoliitin oletetaan olevan komatiittisia oliviinikumulaatteja, jotka ovat

ensin muuttuneet serpentiiniksi hydrotermisissä prosesseissa, ja myöhemmin vuolukiviksi metamorfoosin ja hiilidioksidirikkaiden fluidien vaikutuksesta (Luukkonen & Sorjonen-Ward, 1998; Kärki & Gehör, 2005; Pekkarinen ym., 2006). Orogeniassa, osa merellistä kuorta on ylityöntynyt mantereisen kuoren päälle ja muodostanut ofioliittikompleksin (Kärki & Gehör, 2005; Pekkarinen ym., 2006). Itä-Suomen vuolukivet edustavat tämän ofioliittikompleksin rajattua osaa (Kärki & Gehör, 2005).

3.2 Esiintyminen

Otollisia alueita vuolukivien esiintymiselle ovat vanhat prekambriset, orogeeniset alueet, kuten Suomen kallioperä (Luukkonen & Sorjonen-Ward, 1998; Kärki & Gehör, 2005). Vuolukiveä voi esiintyä myös nuoremmilla orogeenisilla alueilla, tästä esimerkkinä Kaledoniinien vuorijonopoimutus Norjassa (Storemyr & Heldal, 2002).

Kiina, Intia, Brasilia, Yhdysvallat, Venäjä, Suomi ja Norja ovat suurimpia vuolukiven tuottajamaita (Swenson, 2017; Silva & Cole, 2017). Tämän lisäksi suuria, tunnettuja esiintymiä on myös Australiassa ja Kanadassa (Swenson, 2017). Suomalaisia vuolukiviesiintymiä on löydetty runsaasti Itä-Suomesta, pääosin Karjalan sekä Kainuun maakunnista (Kärki & Gehör, 2005; Selkonen ym., 2018). Suurimpana näistä esiintymistä Nunnanlahden vuolukiviesiintymä (Kärki & Gehör, 2005; Kärki ym., 2013). Juuassa sijaitsevasta Nunnanlahdesta vuolukiveä on louhittu jo 1800-luvulta lähtien ja louhimon varannot ovat 29 miljoonaa tonnia (NunnaUuni Oy; Pekkarinen ym., 2006). Turvallisuus ja kemikaaliviraston vuoden 2020 tilastojen mukaan Suomen vuolukivilouhoksista oli yhteensä kaivettu noin 140 000 tonnia vuolukiveä (Tukes, 2020). Suomen vuolukivipotentiaalia on tutkittu useissa eri hankkeissa, joiden mukaan hyviä vuolukiviaihteita on runsaasti ja jo löydettyjen esiintymien varannot ovat rikkaat (Selkonen ym., 2018). Suomesta on kuitenkin mahdollista löytää uusia esiintymiä ja käyttökelpoisia tuotantokohteita (Selkonen ym., 2018).

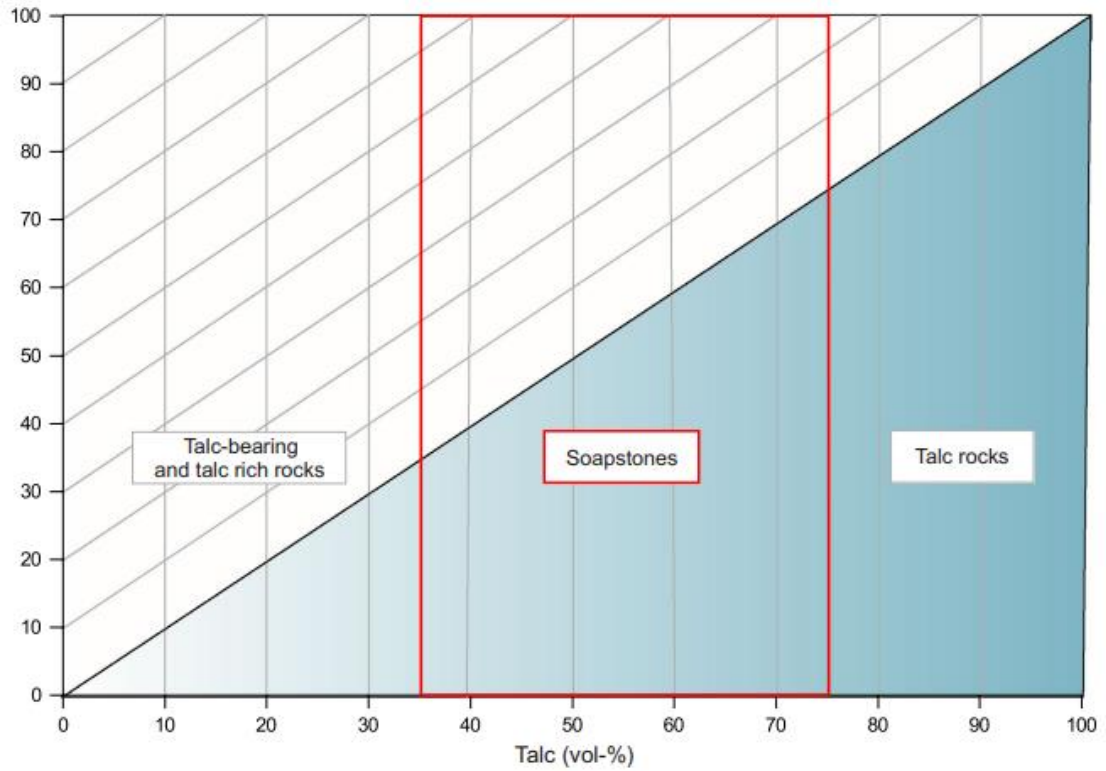
3.3 Luokittelu

Koska vuolukivillä on useita erilaisia protoliitteja ja syntytapoja, sekä niiden mineralogisessa koostumuksessa ja rakenteissa on runsaasti vaihtelevuutta, on niiden luokittelu tärkeää. Vuolukivillä ei ole IUGS-SCMR (International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematic of Metamorphic Rocks) standardien mukaista luokitusta (Huhta & Kärki, 2018). Wiik (1953) luokitteli vuolukivet kolmeen ryhmään mineraalikoostumuksen mukaan: 1. karbonaattivuolukiviin, 2. tremoliittivuolukiviin ja 3. Godthaab-tyypin vuolukiviin. Myöhemmin, Kärki ym. (2008) kehitti osana VUKE-I projektia vuolukivien tentatiivisen luokittelujärjestelmän, joka toimi pohjana Huhdan & Kärjen (2018) IUGS-SCMR suosituksia vastaavalle luokittelulle. Vuolukivien luokittelu on tärkeää tulisijoja valmistavalle vuolukiviteollisuudelle, jossa oikeanlaisen kiven käyttö korkean lämpötilan vaativissa olosuhteissa on kriittistä (Huhta & Kärki, 2018).

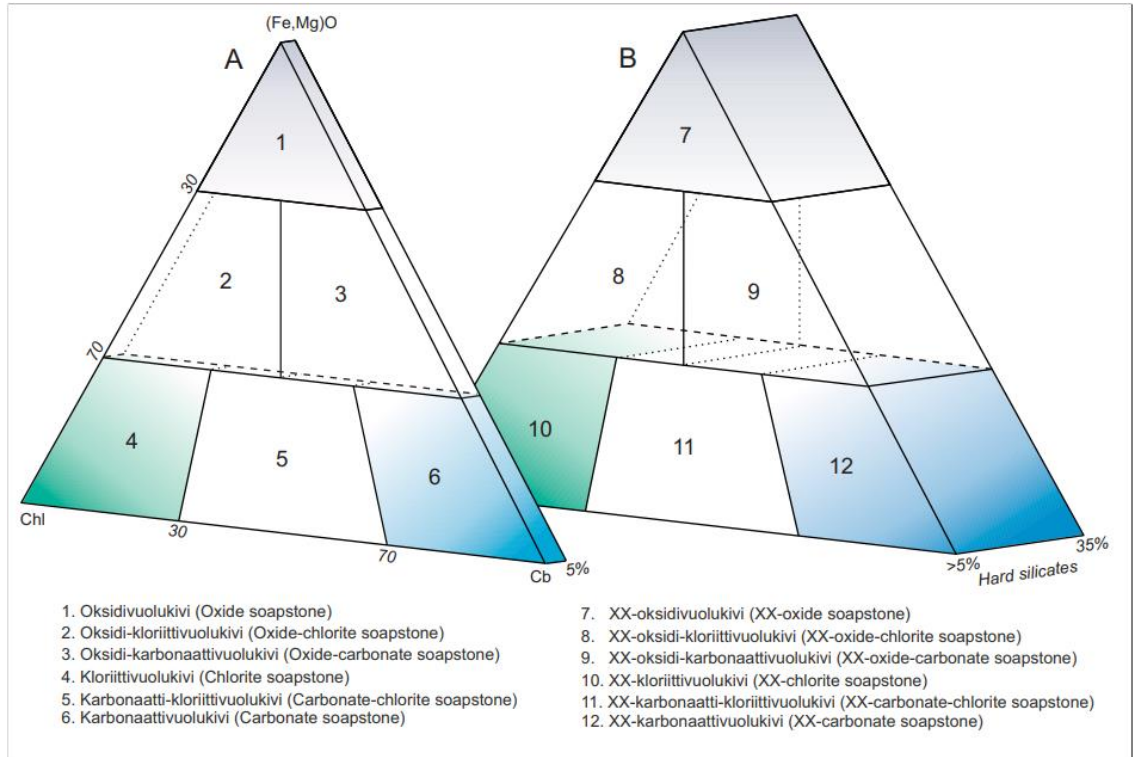
Huhdan & Kärjen (2018) kehittämän vuolukivien mineraalikoostumukseen perustuvan luokittelun mukaan vuolukiviksi voidaan kutsua sellaista kiveä, jonka talkkipitoisuus on välillä 35-75%. Alle 35% talkkia sisältävät kivilajit ovat Huhdan ja Kärjen (2018) mukaan talkkia sisältäviä ja talkkirikkaita kiviä, ja yli 75% talkkia sisältävät kivet ovat talkkikiviä. Kuvassa 3 näkyy Huhdan ja Kärjen (2018) luokitteludiagrammi, jossa vuolukivet on eroteltu muista kivistä talkkipitoisuuden ja muiden mineraalien pitoisuuksien perusteella.

Kovien silikaattien, kuten serpentiinin ja amfibolin määrä vuolukivissä ei saa ylittää 35% (Huhta & Kärki, 2018). Kuvassa 4 esitettynä vuolukivien luokitteludiagrammi oksidien, kloriitin ja karbonaattien suhteiden mukaan (Huhta & Kärki, 2018).

Vuolukivissä missä on alle 5% kovia silikaatteja, nimetään oksidivuolukiviksi, kloriittivuolukiviksi tai karbonaattivuolukiviksi prosenttiosuuksien mukaan (Kuva 4A; Huhta & Kärki, 2018). Jos jonkin tietyn kovan silikaattimineraalin määrä on korkeampi kuin 5%, tulee nimen etuliitteeksi lisätä kyseisen silikaatin nimi (Kuva 4B; Huhta & Kärki, 2018).



Kuva 1. Vuolukivien talkkipitoisuus (Huhta & Kärki, 2018)



Kuva 2. Vuolukivet missä kovia silikaatteja A. 0-5% ja B. > 5-35%. XX tarkoittaa tärkeimmän lisänä olevan silikaattimineraalin nimeä. (Huhta & Kärki, 2018)

Mineraalien prosenttiosuuksien lisäksi, mineraalien asu ja tekstuuri vaihtelee vuolukivilajien mukaan (Kärki ym., 2013). Päämineraaleista talkki esiintyy vuolukivissä usein tiiviinä ja hienorakeisena massana ja on usein yksi tärkeistä kiven rakennetta kasassa pitävistä komponenteista (Kärki ym., 2013). Kuitenkin talkki voi esiintyä myös karkearakeisena etenkin serpentiinivuolukivissä (Kärki ym., 2013). Kärjen ym. (2013) mukaan karbonaattimineraalit, kuten kalsiitti, dolomiitti sekä magnesiitti-sideriittisarjan karbonaattimineraalit, esiintyvät vuolukivessä rakeina, jotka ovat joko koostumukseltaan vyöhykkeellisinä, sisäosien ollessa rautarikkaampia. Serpentiini taas esiintyy vuolukivessä usein joko suurina kasautumina tai verkostomaisesti, ja koostumuksessa saattaa olla myös rautaa (Kärki ym., 2013). Kloriittiryhmän mineraalit esiintyvät useimmiten yhdessä talkin kanssa talkin suomurakenteiden lomassa, mutta myös selvempinä yksinään kloriitista koostuvina juonina (Kärki ym., 2013).

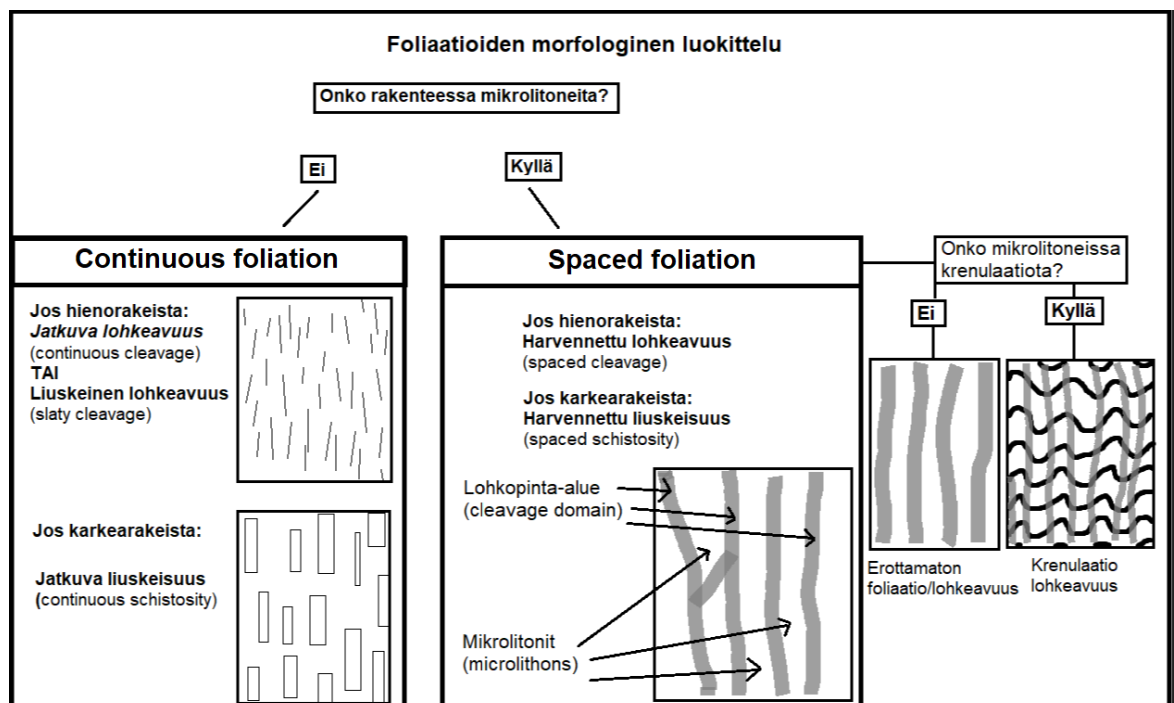
3.4 Mikrorakenteet

Vuolukiviin muodostuu metamorfoosin ja deformaation vaikutuksesta mikrorakenteita, jotka vaikuttavat kiven fysikaalisiin ominaisuuksiin merkittävästi (Huhta, 2019). Vuolukivien rakenne saattaa olla granoblastista eli suuntautumattomaa, folioitunutta eli liuskeista, tai niissä voi olla venymän aiheuttamaa lineaatiota (Huhta, 2019). Näitä vuolukivissä esiintyviä mikrorakenteita kutsutaan sekundäärisiksi rakenteiksi (Passchier & Trouw, 2005). Mikrorakenteiden ymmärtäminen on tärkeää, esimerkiksi tutkittaessa metamorfisten kiven kestävyyttä erilaisissa olosuhteissa. Etenkin foliaatiot ja lineaatiot ovat vuolukivien kohdalla tärkeitä piirteitä johtuen vuolukivien mineralogiasta (Huhta, 2019).

Granoblastiset mikrorakenteet syntyvät suuri- ja tasarakeisiin, sekä ei-omamuotoisista mineraalirakeista koostuviin kiviin niiden uudelleen kiteytyessä (Passchier & Trouw, 2005; Huhta, 2019). Koska vuolukivet sisältävät suurimmaksi osaksi rakenteeltaan suomumaisia verkkosilikaatteja, suuntautumattomuutta ei yleensä niissä esiinny (Kärki ym., 2013). Ainoastaan osassa serpentiinivuolukivissä on nähtävissä

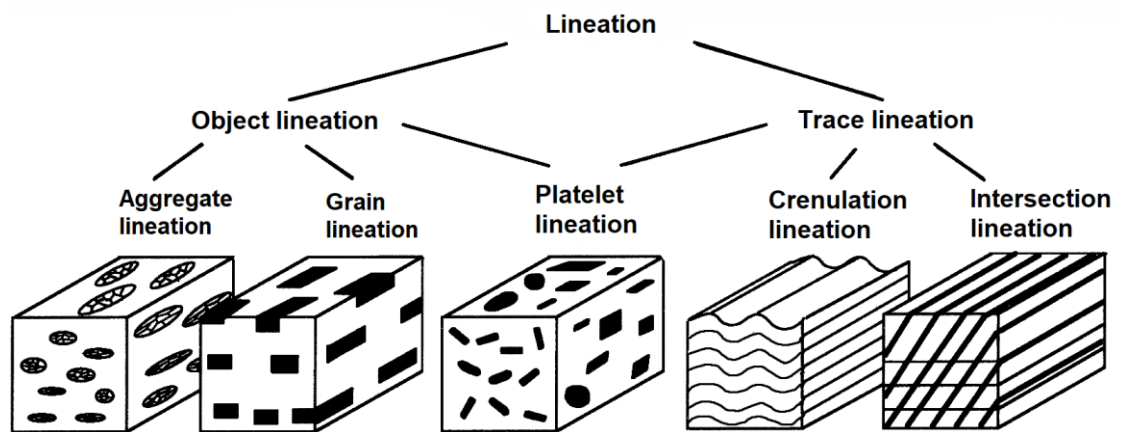
suuntautumattomuutta, eli niitä voidaan kutsua granoblastisiksi vuolukiviksi (Kärki ym., 2013).

Foliaatiot syntyvät laattamaisten ja planaaristen mineraalien suuntautuessa yhdenmukaisesti (esimerkiksi talkki, kloriitti ja serpentiini vuolukivissä; Passchier & Trouw, 2005; Kärki ym., 2013). Foliaatiot voidaan jakaa kahteen pääryhmään: ns. ”continuous foliation” ja ”spaced foliation” (Passchier & Trouw, 2005). Passchier & Trouw (2005) mukaan ”continuous foliation” voi syntyä koko kiven mukaisesti deformaation vaikutuksesta. Spaced foliaatiossa rakeiseen, epätasaiseen kiveen on muodostunut kerroksittain lohkopinta-alueita (eng. cleavage domain), ja niiden väliin ei-deformoituneita mikrolitoneita (eng. microlithons; Passchier & Trouw, 2005). Mikrolitonien ja lohkopinta-alueiden mineralogia eroavat toisistaan, minkä takia deformaatio on vaikuttanut niihin eri tavalla, tai ei ollenkaan (Passchier & Trouw, 2005). Erilaiset foliaatiotyypit ja niiden luokittelu esitetään Kuvassa 1 (Passchier & Trouw, 2005).



Kuva 3. Foliaatioiden luokittelu. (muokattu Passchier & Trouw, 2005 jälkeen)

Lineaatiot ovat viivamaisia rakennepiirteitä, jotka esiintyvät kauttaaltaan kivessä, niitä läpäisevästi (Piazolo & Passchier, 2002). Lineaatiot voidaan jakaa niin sanottuihin object-lineaatioihin ja trace-lineaatioihin (Piazolo & Passchier, 2002). Piazolo & Passchier (2002) mukaan object-lineaatiot ovat sellaisia, missä tietyt kiven osat, kuten rakeet ovat ryhmittyneet rinnakkaisesti ja tietyn suuntaisesti. Nämä voidaan edelleen jakaa ns. aggregate-lineaatioihin ja grain-lineaatioihin (Piazolo & Passchier, 2002). Trace-lineaatiot ovat sellaisia lineaatioita kivessä, joilla ei ole volyyymiä, kuten objektilineaatiossa ja ne voidaan jakaa krenulaatiolineaatioihin ja leikkauslineaatioihin (eng. intersection lineation; Piazolo & Passchier, 2002). Kuvassa 2 esitettynä erilaiset lineaatiotyypit esimerkkikuvineen (Piazolo & Passchier, 2002).



Kuva 4. Lineaatiotyypit (muokattu Piazolo & Passchier, 2002 jälkeen)

Vuolukivien mikrorakenteet vaikuttavat suuresti vuolukivien fysikaalisiin ominaisuuksiin (Huhta, 2019). Etenkin foliaatioilla ja lineaatioilla on merkittävä vaikutus esimerkiksi vuolukivien lämpöominaisuuksiin kuten termisen sokin kestävyys (Huhta, 2019). Vuolukiven käyttäytyminen vaihtelee myös foliaation ja lineaation suunnan mukaan tarkasteltaessa (Huhta, 2019).

3.5 Tiheys

Vuolukivien yleisesti ottaen korkea tiheys on yksi tärkeä ominaisuus, jolla on merkitystä niiden käytön kannalta, esimerkiksi pöytätaasoissa, missä kivi ei saa

tahriintua (King, 2016). Yleisimpien kivilajien fysikaalisia ominaisuuksia on tutkittu paljon ja useita kirjoja sekä tutkimuksia aiheesta on julkaistu. Esimerkiksi Schön (2004) on kirjoittanut kattavasti erilaisten kivien ominaisuuksista. Hänen mukaansa magmaattisten ja metamorfisten kivien tiheysarvoihin vaikuttavat niiden happamuus ja emäksisyys. Happamilla kivilajeilla on usein alhaisempi tiheys kuin emäksisillä (Schön, 2004). Näin ollen ultraemäksisestä vaipan aineksesta syntyneet, alhaisen piipitoisuuden vuolukivet ovat keskivertoa tiheämpiä kiviä (Kärki & Gehör, 2005). Metamorfisten kivien tiheyteen vaikuttavia tekijöitä ovat myös lämpötila sekä heikkoudet kuten raot tai halkeamat (Schön, 2004). Liu & Xu (2015) mukaan kivien tiheys pienenee asteittain lämpötilan kasvaessa. Schönin (2004) mukaan kivessä olevat halkeamat alentavat kiven tiheyttä, mutta rakojen tiivistyessä paineen seurauksena tiheys voi myös kasvaa. Vuolukivissä esiintyvistä mineraaleista tiheimpiä ovat karbonaatit ja oksidit (Kärki ym., 2013). Kärjen ym. (2013) tekemien vuolukivien tiheysmittauksien mukaan magnesiittivuolukivien kestitiheys on noin 3 g/cm^3 , amfibolivuolukivien 2.9 g/cm^3 ja serpentiinivuolukivien 2.8 g/cm^3 . Monien muiden, yleisempien magmaattisten ja metamorfisten kivilajien keskitiheydet ovat yleensä hieman näitä lukemia alhaisempia, esimerkiksi gneissin tiheys on välillä $2.5\text{--}2.8 \text{ g/cm}^3$ ja graniitin $2.5\text{--}2.7 \text{ g/cm}^3$ (Schön, 2004).

4. VUOLUKIVIEN LÄMPÖOMINAISUUDET

Koska vuolukiveä käytetään runsaasti uunien ja takkojen valmistuksessa, niiden tärkeimpiä lämpöön liittyviä ominaisuuksia ovat lämmönjohtokyky, ominaislämpökapasiteetti, lämmönvarastointikapasiteetti ja termisen sokin kestävyys (Kärki ym., 2013; Huhta ym., 2019; Huhta, 2019). Myös lämpölaajeneminen, lämpöhajoaminen, lämmönkestävyys ja terminen diffuusiokerroin ovat tärkeitä kivien lämpöominaisuuksia (Kärki ym., 2013; Huhta, 2019). Vaihtelevan mineraalikoostumuksen ja tekstuurien vuoksi myös vuolukivien fysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat laajasti (Huhta & Kärki, 2018). Tästä syystä kaikki vuolukiviksi kutsuttavat kivet eivät sovellu esimerkiksi uunien rakennusmateriaaliksi, koska kiven täytyy kestää korkeimmillaan $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ asteen lämpötiloja jopa vuosikymmenien ajan (Kärki & Gehör, 2005).

4.1 Lämmönjohtavuus

Lämpöenergian siirtyminen toteutuu fyysisin prosessein, kuten johtumalla, konvektion kautta ja säteilemällä (Clauser & Huenges, 1995; Schön, 2004). Lämmön johtuminen tapahtuu kidehilojen vuorovaikutuksessa, kun lämpö kulkee aineen läpi ja konvektiossa lämpö siirtyy lämmitetyn aineksen osien suhteellisen liikkeen vaikutuksesta (Schön, 2004). Elektromagneettinen säteily siirtää lämpöä suoraan aineksen kaukaisesta osasta toiseen ja tämä on päätekijä lämmön johtumiselle korkeissa lämpötiloissa (Schön, 2004). Yleisesti kivien lämmönjohtokyky vähenee niitä lämmittäessä (Kärki ym., 2013). Tämän lisäksi vaaleita mineraaleja, kuten kvartsia sisältävien kivien lämmönjohtavuus alenee nopeammin lämpötilojen kasvaessa (Kärki ym., 2013). Luonnonkivien lämmönjohtokykyyn vaikuttavat niiden mineraalikoostumus, paine, anisotrooppisuus, huokosvesien läsnäolo ja saturaation aste (Clauser & Huenges, 1995).

Vuolukivillä on erittäin hyvä lämmönjohtokyky, huoneenlämmössä keskimäärin 6–7 W/mK, ja 300 °C asteessa 4,5–5 W/mK (Kärki ym., 2013). Verratessa esimerkiksi graniitin keskimääräinen lämmönjohtavuus huoneen lämmössä on 2–4.5 W/mK ja gneissin 1.5–5 W/mK (Seipold & Huenges, 1998; Schön, 2004; Miranda ym., 2018). Vuolukivien korkeat lämmönjohtavuusarvot johtuvat niiden korkeasta tiheydestä, mineralogisesta koostumuksesta ja mikrorakenteista (Kärki ym., 2013). Vuolukivien lämmönjohtavuus on anisotrooppista, eli se vaihtelee suunnasta riippuen (Kärki ym., 2013). Tämä täytyy ottaa huomioon vuolukiven käytössä etenkin, kun kivi on usein hyvin suuntautunutta (Kärki & Gehör, 2005). Mineralogisesti, etenkin vuolukivissä yleisesti esiintyvällä magnesiitilla on luonnostaan hyvä lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti (Kärki ym., 2013).

Kärki ym. (2013) raportoivat lämmönjohtavuuskokeiden tuloksia, joiden perusteella lämmönjohtavuuden havaittiin olevan korkeampi foliaation suunnassa kuin kohtisuoraan foliaatioon nähden. Vuolukivilajeista serpentiiniä ja kloriitteja sisältävät kivet saivat alhaisimmat lämmönjohtavuus-arvot (Kärki ym., 2013). Oksidi-karbonaattivuolukivillä oli korkein lämmönjohtavuus, ja yleisesti karbonaattivuolukivet olivat keskimäärin parhaiten lämpöä johtavia. Taulukossa 1 nähdään erilaisten vuolukivilajien lämmönjohtavuuksia huoneenlämmössä ja + 300 °C asteessa, sekä suuntautuneiden rakenteiden vaikutus (Kärki ym., 2013).

Kärjen ym. (2013) mukaan terminen diffuusiokerroin oli noin 1-2 mm²/s huoneenlämmössä ja 300 °C asteessa hieman yli tai alle 1 mm²/s. Terminen diffuusiokerroin mittaa sitä, kuinka nopeasti materiaali saavuttaa ympäristönsä lämpötilan (Kärki ym., 2013).

Taulukko 1: Erilaisten vuolukivilajien lämmönjohtavuuksia (W/mK) + 20°C ja + 300°C keskilämpötiloissa. (Kärki ym., 2013)

Kivilaji	Suuntautuneiden kivien mittaussuunta	Lämmönjoht. +20°C W/mK	Lämmönjoht. +300°C W/mK
Karbonaatti-kloriittivuolukivi	Foliaation tasossa	6.069	4.416
Karbonaatti-kloriittivuolukivi	Foliaation suuntaa vastaan kohtisuoraan	2.943	3.048
Karbonaattivuolukivi		8.152	5.235
Amfibolipitoinen serpentiinivuolukivi		7.088	5.154
Serpentiinipitoinen karbonaattivuolukivi		6.085	4.513
Kloriitti-karbonaattivuolukivi	Foliaation tasossa	8.065	4.534
Kloriitti-karbonaattivuolukivi	Foliaatiota vastaan kohtisuoraan	7.607	4.072
Oksidi-karbonaattivuolukivi		9.560	5.156
Karbonaattivuolukivi	Foliaation tasossa	9.137	5.337
Karbonaattivuolukivi	Foliaatiota vastaan kohtisuoraan	7.946	4.686

4.2 Ominaislämpö

Vuolukivillä on hyvä ominaislämpökapasiteetti, eli kyky vastaanottaa lämpöenergiaa itseensä (Kärki ym., 2013). Mitä korkeampi kiven tiheys on, sitä korkeampi on myös sen ominaislämpökapasiteetti (Kärki ym., 2013). Kärjen ym. (2013) mukaan karbonaatit ja oksidit ovat tiheimpiä vuolukivissä esiintyviä mineraaleja ja näin ollen niitä sisältävät vuolukivet saavat myös suurimmat ominaislämpöarvot. Esimerkiksi karbonaattivuolukivillä, joiden tiheys on keskimäärin noin 3 g/cm³, on myös suhteellisen korkeat ominaislämmöt, 3,5–4,0 MJ/m³K (Kärki ym., 2013). Tiheydeltään

alhaisempien serpentiinivuolukivien (2.8 g/cm^3) ominaislämmöt olivat noin 2,5–3,3 MJ/m³K välillä (Kärki ym., 2013). Taulukossa 2 on esitetty Kärjen ym. (2013) tutkimien vuolukivilajien ominaislämmöt + 20 sekä + 300 °C asteen keskilämpötiloissa. Myös ominaislämpömittauksissa oksidikarbonaattivuolukivi saa korkeimmat arvot, mutta tässä poikkeuksellisesti oksidipitoisen kiven ominaislämpö ei kasva, vaan hieman alenee mentäessä korkeampaan lämpötilaan (Kärki ym., 2013).

Taulukko 2: Erilaisten vuolukivilajien ominaislämpöjä (MJ/m³K) + 20°C ja + 300°C keskilämpötiloissa. (Kärki ym., 2013)

Kivilaji	Ominaislämpö +20°C; MJ/m ³ K	Ominaislämpö +300°C; MJ/m ³ K
Oksidi-karbonaattivuolukivi	4.944	4.940
Karbonaatti-kloriittivuolukivi	2.526	3.192
Kloriitti-karbonaattivuolukivi	3.847	5.523
Karbonaattivuolukivi	3.854	5.067
Karbonaattivuolukivi	3.479	4.125
Amfibolipitoinen serpentiinivuolukivi	3.258	5.094
Serpentiinipitoinen karbonaattivuolukivi	3.215	3.716

4.3 Lämpölaajeneminen

Lämpölaajeneminen on tärkeä fysikaalinen ilmiö, missä materia muuttaa muotoaan ja volyymiään lämpötilan muuttuessa (Huhta, 2019). Vuolukivissä tämä ilmiö ja siitä johtuva pysyvä pituusmuutos ovat kiven mineraalikoostumuksen ja mikrorakenteiden kontrolloimaa (Kärki ym., 2013). Lämpölaajeneminen aiheuttaa myös tiheyden pienenemistä ja huokoisuuden kasvamista, kun kiveen syntyy mikrosäröjä nousevassa kuumuudessa (Kärki ym., 2013). Mineraaleissa tapahtuva lämpölaajeneminen voi olla joko isotrooppista tai anisotrooppista (Kärki ym., 2013). Kärjen ym. (2013) toteuttamien mittausten perusteella kaikissa vuolukivien yleisimmissä päämineraaleissa

lämpölaajeneminen tapahtuu anisotrooppisesti ja magnesiitin sekä talkin lämpölaajeneminen on suurinta mineralogisen c-akselin suunnassa. Puhtaasti lämpölaajenemisesta johtuva pituusmuutos on useimmiten palautuvaa, mutta on tilanteita, joissa tietyn mineraalispesieksen voimakas lämpölaajeneminen voi aiheuttaa kiven rikkoutumisen, joka johtaa pysyvään pituusmuunnokseen (Kärki ym., 2013). Tämän lisäksi hyvin korkeat lämpötilat saattavat aiheuttaa faasimuutoksia kivessä, jotka synnyttävät uusia mineraaliseurueita ja näin ollen aiheuttavat kiven tilavuuden pienenemistä ja synnyttävät huokoisuutta kivessä (Kärki ym., 2013). Kärjen ym. (2013) mukaan useimmat vuolukivilajit laajenevat hyvin vähän, kun niitä lämmitetään, etenkin karbonaatti- ja serpentiinivuolukivet. Nämä vuolukivilajit laajenevat vain 2% 1100 °C asteessa. Muista vuolukivilajeista eroten kloriittivuolukivet laajenivat pysyvästi korkeissa lämpötiloissa verrattain paljon, etenkin kiven foliaatioon nähden kohtisuoraan (Kärki ym., 2013). Lämpölaajeneminen on siis tärkeä vuolukivissä tapahtuva ilmiö, kun ajatellaan niiden käyttöä uunien valmistamisessa, missä kiven pituuden tai tiheyden muutosta ei haluta tapahtuvan.

4.4 Lämpöhajoaminen

Lämpöhajoamista tapahtuu, kun kiveä kuumennettaessa sen massa muuttuu eri kaasufaasien poistuessa systeemistä mineraalireaktioiden seurauksena eri lämpötilatasoilla (Huhta, 2019). Termistä hajoamista tapahtuu vuolukivissä, kun päämineraaleissa tapahtuu reaktioita kiven kuumentamisen aikana eri vaiheissa, minkä seurauksena sen massa yleensä pienenee (Kärki ym., 2013). Esimerkiksi hydroksyyli (OH) poistuu talkista noin 800–1000 °C asteessa, muodostaen vesimolekyylin (Kärki ym., 2013). Tätä reaktiota kutsutaan dehydroksylaatioksi (Kärki ym., 2013). Liun ym. (2014) mukaan puhdas talkki muuttuu enstatiitiksi 800 °C asteessa ja 1000 °C asteessa dehydroksylaatioreaktio on kokonaan loppunut. Magnesiitin, vuolukiven toisen päämineraalin lämpöhajoaminen tapahtuu, kun hiilidioksidimolekyyli vapautuu systeemistä 530–600°C asteessa (Kärki ym., 2013). Kärjen ym. (2013) mukaan karbonaattikomponentin hiilidioksidin poistuminen kiinteästä faasista on tärkein termisen hajoamisen aiheuttama massaa alentava reaktio vuolukivissä. Lisäksi magnesiitin dekarbonatisaatioon vaikuttaa vahvasti sen rautapitoisuus, siten että

lämpöhajoaminen alkaa rautarikkaassa magnesiitissa korkeammissa lämpötiloissa. (Kulp ym., 1951; Kärki ym., 2013). Myös talkin dehydroksylaatioon vaikuttaa samoin rautapitoisuus, missä lämpöhajoaminen tapahtuu rautarikasta talkkia kuumentessa (Kärki ym., 2013). Kärjen ym. (2013) mukaan myös muissa vuolukivilajeista, kuten serpentiini- ja kloriittivuolukivissä lämpöhajoamiseen vaikuttavat rautapitoisuus.

4.5 Termisen sokin kestävyys

Uunien ja tulisijojen valmistuksessa käytettävän vuolukiven tulee kestää korkeita lämpötiloja ja suuria lämpötilavaihteluita useiden vuosikymmenien ajan (Huhta ym., 2016). Tällöin kiven pintaosat joutuvat kovan lämpörasituksen alaiseksi ja niin sanottu terminen sokki aiheutuu silloin, kun kivi altistuu nopeasti korkealle kuumuudelle ja täten heikkenee (Huhta ym., 2016). Terminen sokki voi myös aiheuttaa kiven rikkoutumisen (Huhta ym., 2016). Terminen sokki on siis mekaaninen ilmiö, jossa nopea lämpötilan vaihtelu aiheuttaa liiallista kuormittumista kiveen ja termisen sokin kestävyys on korkein mahdollinen pinnan lämpötila, jota kiinteä aines pystyy kestämaan hajoamatta (Huhta, 2019). Tietyillä vuolukivilajeilla on suhteellisen korkea termisen sokin kestävyys (Huhta ym., 2016). Tulisijamateriaalina vuolukivilajien täytyy kestää 600–1000 °C asteen lämpötiloja (Kärki ym., 2013; Huhta ym., 2016).

Yleisesti kivien termisen sokin kestävyys vaikuttavat näytteen mineraloginen koostumus, näytteen koko, lämmönsiirtokerroin, lämmönjohtokyky, lämpölaajenemiskerroin, terminen diffuusiokerroin, kimmokerroin, murtolujuus, vetolujuus ja se kuinka pitkään näyte on altistuneena kuumuudelle (Huhta, 2019; Lindqvist ym., 2007). Lisäksi kivien lämpötilavaihteluiden ja kuumuuden kestokykyyn vaikuttavat raekoko, huokoisuus, kemiallinen koostumus, kidehilojen orientoituminen sekä mikrorakenteet kuten foliaatiot ja niiden suuntautuminen (Lindqvist ym., 2007).

Huhta ym. (2016) testasivat erilaisten vuolukivilajien kykyä kestää lämpörasitusta tekemällä niin sanottuja TSR-testejä. Tutkimus keskittyi erityisesti magnesiittivuolukivien tekstuurien ja mineralogisten eroavaisuuksien vaikutusta termisen sokin kestävyys (Huhta ym., 2016).

Huhdan ym. (2016) TSR-testeissä testattiin hienorakeisia karbonaattikiviä, joiden talkkipitoisuus oli 40-60% ja karbonaattipitoisuus 35-50%. Testeissä tuli ilmi, että porfyroblastiset ja metamorfista raitaisuutta (banding) sisältävät magnesiittivuolukivet olivat raekooltaan karkeimpia ja niillä oli alhaisin termisen sokin kestävyyskapasiteetti (Huhta ym., 2016). Huhdan ym. (2016) mukaan parhaiten suuria lämpötilavaihteluita kestävätkin sellaiset magnesiittivuolukivet, joiden mikrorakenne koostuu ns. spaced foliaatiosta, missä lohkopinta-alueet olivat tasaisia ja lyhyitä. Myös krenulaatiolohkeavuus folioituneissa magnesiittivuolukivissä, missä on rautapitoisia talkki ja magnesiittirakeita, paransi tällaisten vuolukivien termisen sokin kestävyyttä (Huhta ym., 2016). Yleisesti ottaen isotrooppiset ja hienorakeiset vuolukivet siis kestävätkin paremmin lämpötilojen vaihteluita ja kuumentamista hyvin korkeisiin lämpötiloihin, verrattuna heterogeenisiin ja karkearakeisiin vuolukiviin (Huhta ym., 2016).

4.6 Lämmön aiheuttamat mineralogiset muutokset

Vuolukivien lämmönkestävyyttä parantavat tietyn tyyppisten vuolukivien pintojen mineralogiassa tapahtuvat muutokset pitkäaikaisen kuumuuden vaikutuksesta (Huhta ym., 2019). Huhta ym. (2019) tutkivat tarkemmin magnesiittivuolukivestä valmistettujen uunien tulipesäkivien pinnoilla tapahtuvia reaktioita. Aiemmin vuolukivien mineralogisia muutoksia on tutkittu esim. Gehör ym. (1994) toimesta. Kärki ym. (2013) testasivat VUKE-II projektissa erilaisten vuolukivilajien reagointia korkeissa lämpötiloissa, missä havaittiin, että vuolukivissä reaktiot tapahtuivat 540°C ja 1000°C välillä. Tällaiset lämpötilat tai jopa korkeammat voidaan saavuttaa vuolukiviuuneissa puuta polttaessa (Kärki ym., 2013). Joutuessa pitkäaikaisen lämpötilavaihtelun alaiseksi, magnesiittivuolukiven pinnoilla tapahtuvat mineralogiset muutokset aiheuttavat vuolukiven tulipesän suunnassa olevan pinnan kovettumista, jotka parantavat kiven lämmönkestävyyttä entisestään (Huhta ym., 2019). Esimerkiksi puun polton yhteydessä syntyvät palokaasut nostavat tietyissä osissa vuolukiviuunin lämpötilat jopa 1200 °C asteeseen (Huhta ym., 2019). Periklaasin syntyminen on tunnetuin mineraloginen muutos, joka tapahtuu uunin seinien kivissä, mutta se ei

yksistään aiheuta erittäin hyvin kuumuutta kestävää mineralogista koostumusta vuolukiveen (Kärki ym., 2013).

Huhta ym. (2019) esittivät, että magnesiittivuolukivien pinta kovettuu tiettyjen reaktioiden seurauksena. Esimerkiksi raudan rikastuminen magnesiittivuolukiven pinnan läheisyyteen, ferropriklaasiaggregaatteihin, kovettaa kiveä (Huhta ym., 2019). Myös brusiitin muodostuminen ja serpentiiniytyminen, kloriitin muuttuminen vesiköyhäksi kloriittifaasiksi sekä talkkirakeiden reunojen muuttuminen enstatiitiksi ja/tai forsteriitiksi aiheuttavat pinnan kovettumista magnesiittivuolukivessä (Huhta ym., 2019). Näiden lisäksi, kun uunissa poltetaan puuta, siitä syntyvät palokaasut aiheuttavat sinkin ja kaliumin rikastumista vuolukiven pintaosiin (Huhta ym., 2019). Näitä reaktioita tapahtuu pitkän ajan kuluessa korkeissa lämpötiloissa, kovettaen vuolukiven pintaosia ja parantaen sen kestävyyttä (Huhta ym., 2019).

5. YHTEENVETO

Vuolukivien lämpöominaisuuksien ja työstettävyyden ansiosta, vuolukivet soveltuvat hyvin hyötykäyttöön. Kuitenkin vuolukivien hyödynnettävyys on vahvasti sidoksissa niiden kemialliseen, mineralogiseen ja rakenteelliseen koostumukseen, joka vaihtelee suuresti. Esimerkiksi mikrorakenteiden merkitys on huomattava etenkin kivien lämpöominaisuuksia ajatellen. Lisäksi vuolukivien mineraloginen muuttuminen johtuen pitkäaikaisesta altistumisesta kuumuudelle tulipesissä, johtaa muutokseen vuolukivien kestävydessä.

Vuolukivien pehmeys ja korkea tiheys tekevät niistä helppokäyttöisiä hyötykiviä, mitä on osattu käyttää jo tuhansia vuosia avuksi erilaisissa arkisissa asioissa kuten astioissa, työvälineissä ja veistosten materiaalina. Myös rakennusmateriaalina vuolukiveä on käytetty, vaikkakin haittana on ollut kiven helppo naarmuuntuminen. Ulkonäöllisistä ja tunnelmallisista syistä vuolukivestä valmistetaan yhä muun muassa koristeita, tai niitä käytetään rakennusten verhouksissa ja laatoituksissa. Vuolukivien parhaimpiin ominaisuuksiin lukeutuvat niiden erittäin hyvä korkeiden lämpötilojen kestokyky, lämmönjohtavuus ja ominaislämpö. Nämä piirteet ovat suurin syy miksi vuolukiveä on käytetty jo 1800-luvulta lähtien nimenomaan uunien ja takkojen valmistuksessa.

LÄHDELUETTELO

Clauser, C. & Huenges, E., 1995. Rock Physics and Phase Relations. A Handbook of Physical Constants. American Geophysical Union. 105-126.

Eckstrand, O.R., 1975. The Dumont serpentinite; a model for control of nickeliferous opaque mineral assemblages by alteration reactions in ultramafic rocks. *Economic Geology*. 70, 183–201.

Gehör, S., Kärki, A., Suoperä, S. & Oraviita, J., 1994. Nunnalahden Uuni Oy Vuolukiven ominaisuuudet I ja II. Kivitieto Oy. 87 s.

Hansen, G. & Storemyr, P., 2017. Soapstone in the North Quarries, Products and People 7000 BC – AD 1700. UBAS – University of Bergen Archaeological Series 9. University of Bergen. 408 s. ISBN 978-82-90273-90-8

Huhta, A. & Kärki, A., 2018. A proposal for the definition, nomenclature, and classification of soapstones, *GFF*. 7 s.

Huhta, A., Kärki, A. & Hanski, E., 2016. A new method for testing thermal shock resistance properties of soapstone – Effects of microstructures and mineralogical variables. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 88. Oulu Mining School, University of Oulu. 21-46. ISSN 1799-4632

Huhta, A., 2019. Diversity of soapstones: Classification and thermal behaviour. *Res Terrae, Publications in Geosciences, Ser. A, No. 39*. University of Oulu. 51 s. ISBN 978-952-62-2206-6

Huhta, A., Tuisku, P., Balic-Zunic, P. & Kärki, A., 2019. Magnesite soapstone in use of fire chamber constructions: composition and structure adaptations. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 91. Oulu Mining School, University of Oulu. 101-118. ISSN 1799-4632

King, H.M., 2016. Soapstone. What is Soapstone? How Does it Form? How is it Used? *Geology.com*. Saatavissa: <https://geology.com/rocks/soapstone.shtml> [Viitattu: 26.4.2021]

Kulp, J. L., Kent, P. & Kerr, P. F., 1951. Thermal study of the Ca-Mg-Fe carbonate minerals. *The American Mineralogist*, 36 (9-10). Columbia University, New York. 643-670.

Kärki, A. & Gehör, S., 2005. Yhteenveto Nunnanlahden Uuni Oy:n MammuttiKivi-kaivoksen materiaalitutkimusten tuloksista vuosilta 1994–2001. Kivitieto Oy. 11 s.

Kärki, A., Havela, T., Huhta, A., Jokinen, J. U. S. & Pohjola, A., 2013. VUKE II OY Vuolukiven materiaaliominaisuudet, Loppuraportti. 33–141

- Kärki, A., Leinonen, S. & Uusitalo, J., 2008. Soapstones – how should they be defined. International Abstract. The 33rd International Geological Congress (33IGC). Oslo, Norway.
- Lindahl, I. & Nilsson, L.P., 2008. Geology of the soapstone deposits of the Linnanjavri area, Hamarøy, Nordland, north Norwegian Caledonides – Norway's largest reserves of soapstone. Teoksessa: Slagstad, T. (toim.), Geology for Society. Geological Survey of Norway Special Publication. 11, 19-35.
- Lindqvist, J. E., Åkesson, U. & Malaga, K., 2007. Microstructures and functional properties of rock materials. *Materials Characterization*. 58(11-12), 1183-1188
- Liu, S. & Xu, J., 2015. An experimental study on the physicommechanical properties of two post-high-temperature rocks. *Engineering Geology*, 185, 63-70.
- Liu, X., Liu, X. & Hu, Y., 2014. Investigation of the thermal decomposition of talc. *Clays and Clay Minerals*, 62, No. 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University. 137-144
- Luukkonen, E. J. & Sorjonen-Ward, E., 1998. Suomen kallioperä, 3000 vuosisimiljoonaa. Luku 4, Arkeinen kallioperä – Ikkuna 3 miljardin vuoden taakse. Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.), Suomen Geologinen Seura ry. 375 s.
- Marques, J.C., Dias, J.R.V.P., Friedrich, B.M., Frantz, J.C., Quieroz, W.J.A. & Botelho, N.F., 2017. Thick chromitite of the Jacurici Complex (NE Craton São Francisco, Brazil): Cumulate chromite slurry in a conduit. *Ore Geology Reviews*. 90, 131-147
- Miranda, M.M., Matos, C.R., Rodrigues, N.V., Pereira, A.J.S.C. & Costa, J.J., 2018. Effect of temperature on the thermal conductivity of a granite with high heat production from central Portugal. *Journal of Iberian Geology*. 45(4), 147–161
- NunnaUuni Oy. NunnaUunin tarina, 2017. Saatavissa: <https://www.nunnauni.com/fi/yritys/> [Viitattu 13.3.2021]
- Passchier, C. W. & Trouw, R. A. J., 2005. *Microtectonics*, second edition. Springer, Berlin. 366 s. ISBN 978-3-540-64003-5
- Pekkarinen, L.J., Korhonen, J., Vuollo, J. & Äikäs, O., 2006. Ristiinan kartta-alueen kallioperä. Summary: Pre-Quaternary Rocks of the Koli map-sheet area. Geological Map of Finland 1:100 000, Explanation to the Maps of Pre-Quaternary Rocks, Sheet 4313. Geologian tutkimuskeskus, Espoo, 115 s.

- Piazolo, S. & Passchier, C. W., 2002. Controls of lineation development in low to medium grade shear zones: a study from the Cap de Creus peninsula, NE Spain. *Journal of Structural Geology*. 24(1), Elsevier. 25-44
- Pirinen, H., Leinonen, S. & Selonen, O., 2018. Soapstone from eastern Finland – characteristics and use. Geotechnical report 11. The Finnish Natural Stone Association. 33 s. ISSN 2489-3161
- Schön, J. H., 2004. Physical Properties of Rocks. Handbook of geophysical exploration, Seismic exploration, 18. Elsevier, Amsterdam. 583 s.
- Seipold, U. & Huenges, E., 1998. Thermal properties of gneisses and amphibolites – high pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples. *Tectonophysics* 291. GeoForschungsZentrum. 173-178
- Selkonen, O., Pirinen, H. & Bulakh, A., 2018. Soapstone production in eastern Finland – a historical perspective. Geotechnical report 12. The Finnish Natural Stone Association. 39 s. ISSN 2489-3161
- Silva, R. & Cole, K., 2017. A Deeper Look at Soapstone. International Surface Fabricators Association. Saatavissa: <https://www.isfanow.org/a-deeper-look-at-soapstone> [Viitattu 25.4.2021]
- Storemyr, P. & Heldal, T., 2002. Soapstone production through Norwegian history: geology, properties, quarrying and use. *Asmosia 5: Interdisciplinary Studies on Ancient Stone*, Hermann, Jr. J. J., Hertz, N. & Newman, R. (toim.), Archetype Publications Ltd., 359-369. ISBN 1-873132-08-5
- Storemyr, P., 2004. Weathering of soapstone in a historical perspective. *Materials Characterization*. 53(2-4), 191-207
- Swenson, P., 2017. Where can soapstone be found? *Sciencing.com*. Saatavissa: <https://sciencing.com/can-soapstone-found-5375861.html> [Viitattu 11.3.2021].
- Turvallisuus ja kemikaalivirasto, Tukes. Tilastotietoja vuoriteollisuudesta 2020.
- Vesasalo, A., 1965. Talc schists and soapstone occurrences in Finland. *Geologinen tutkimuslaitos, Bulletin* 216, 75 s.
- Wiik, H.B., 1953. Composition and origin of soapstone. *Geologinen tutkimuslaitos, Bulletin* 165, 64 s.
- Wyllie, P.J., 1967. Ultramafic and Related Rocks. John Wiley & Sons, Inc., New York. 464 s.

Zhang, R.Y., Liou, J.G. & Cong, B.L., 1995. Talc-, Magnesite- and Ti-clinohumite-bearing Ultrahigh-Pressure Meta—Mafic and Ultramafic complex in the Dabie mountains, China. *Journal of Petrology*. 36(4), 1011-1037